



«Беличья клетка» в трехфазном двигателе



Николай ГРИГОРЬЕВ

Nickolay D. GRIGORIEV

Ему принадлежат особые заслуги в разработке электродвигателей переменного тока, которые применяются на транспорте. Его имя широко известно в электротехнике. К 150-летию со дня рождения русского ученого и изобретателя М. О. Доливо-Добровольского.

Ключевые слова: электрические машины, электродвигатели, Доливо-Добровольский, история.

Григорьев Николай Дмитриевич — кандидат технических наук, доцент Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).

Русский электротехник, создатель техники трехфазного переменного тока, конструктор электрических машин и аппаратов Михаил Осипович Доливо-Добровольский родился 2 января 1862 г. (21 декабря 1861 г. по старому стилю) в городе Гатчина Санкт-Петербургской губернии (ныне — Ленинградская область). Он был первенцем в многодетной семье (после него родилось еще семеро детей). Отец происходил из дворян. В 1872 году его перевели в Одессу, где ему предстояло издавать местную газету.

Именно в Одессе юноша в 1878 году окончил реальное училище, которое в сравнении с гимназией давало среднее образование с большим объемом знаний по математике, физике и биологии. Учебный план включал также химию и черчение, а вместо древних языков — немецкий и французский. Он увлекся химией и поступил на химический факультет Рижского политехнического института. После убийства народовольцами царя Александра II в 1881 году его за участие в студенческих волнениях исключили из института с запрещением учиться в России.

Для продолжения образования Доливо-Добровольский переехал в Германию

и поступил на электротехническое отделение машиностроительного факультета Высшего технического училища в Дармштадте (Великое герцогство Гессен), где большое внимание уделялось практическому применению электричества.

I.

В январе 1882 года Электротехнический (VI) отдел Русского технического общества организовал в Санкт-Петербурге Вторую электрическую выставку. В числе экспонатов слабых токов демонстрировался аппарат, изобретенный Доливо-Добровольским — «кнопка-элемент» для электрических звонков. Но были и другие студенческие научные работы юноши: о соотношении различных величин при заряджении вторичных элементов, теории и практике электролиза. На последнем курсе студент предложил пусковую схему для шунтовых двигателей постоянного тока, что оказало непосредственное влияние на развитие электрического привода. В 1884 году он с отличием окончил училище и был оставлен при нем ассистентом для преподавания нового самостоятельного курса по практическому применению электрохимии.

В 1887 году Доливо-Добровольский перешел на швейцарский электротехнический завод фирмы «Машинен-фабрик Эрликон», а затем поступил на службу конструктором на заводы электротехнической компании Т. А. Эдисона в Германии (впоследствии фирма «Всеобщая компания электричества» (AEG)). Первые его конструкторские работы были связаны с усовершенствованием машин постоянного тока. Предложенные им конструктивная форма и схема четырехполюсных электродвигателей постоянного тока с дополнительными полюсами сохранились до настоящего времени. В 1887–1888 годах он разработал электромагнитные амперметры и вольтметры, которые выпускались фирмой AEG и применялись для измерения постоянных и переменных токов и напряжений.

Осенью 1888 года Доливо-Добровольский в английском журнале прочел статью г. Феррариса «Электродинамическое вращение, произведенное с помощью переменных токов». Он был удивлен ошибочным выводом автора о практической непригодности индукционного электродвигателя, так

как в опыте динамического торможения при замыкании накоротко обмотки якоря двигателя постоянного тока возникал большой тормозной момент. По его предположению, если во вращающееся магнитное поле поместить короткозамкнутый якорь малого сопротивления, он будет вращаться с ничтожным скольжением и КПД электродвигателей, действующих на принципе вращающегося магнитного поля, может быть значительно выше 50%. Следовательно, многофазные электрические машины переменного тока способны стать пригодными для практики.

В том году Доливо-Добровольский, исследуя различные схемы соединения обмоток, сделал ответвления от трех равноотстоящих точек якоря генератора постоянного тока и получил токи с разностью фаз 120 градусов. Таким образом он нашел связанную трехфазную систему переменного тока, т.е. систему из трех переменных токов, сдвинутых по фазе. В каждый момент времени сумма ЭДС, индуцируемых в трех фазах обмотки генератора, равна нулю. Сумма токов, протекающих по проводам к потребителям, также в любой момент времени равна нулю и передавать электроэнергию в этой системе можно по трем проводам, а не по шести в несвязанной трехфазной системе или по четырем, как в двухфазной, либо подобно трехфазной системе Николы Теслы со сдвигом фаз 60 градусов. В симметричной связанной трехпроводной трехфазной системе требуется на 25% меньше меди, чем на два провода в однофазной системе.

Теоретически и опытным путем Доливо-Добровольский доказал возможность простого получения кругового вращающегося магнитного поля при помощи трех одинаковых по амплитуде переменных токов, смещенных по времени на одну треть периода и протекающих по трем обмоткам, размещенным по окружности и сдвинутых на пространственные углы относительно друг друга на 120 градусов. В 1888-м им был спроектирован, а в начале следующего года фирмой AEG построен первый трехфазный генератор переменного тока мощностью 3 л.с. (2,2 кВт). Он по конструкции не отличался от генераторов однофазного переменного тока и имел вращающиеся электромагниты и только на статоре — не одну,



а разделенную на три части (углы между их осями были 120 градусов) обмотку. В ней при вращении ротора индуктировались три одинаковые по амплитуде и частоте ЭДС, но со сдвигом во времени на $1/3$ периода. Эта конструкция электрической машины была положена в основу трехфазных синхронных генераторов и в принципе сохранилась до настоящего времени.

II.

Свойство уравновешенности симметричной трехфазной системы явилось одним из важнейших, ибо в неуравновешенной системе возникает неравномерная механическая нагрузка на генератор, что значительно снижает срок его службы. С 1891 года стали изготавливать промышленные синхронные генераторы трехфазного переменного тока. Они обладают высокими эксплуатационными свойствами, поэтому их применяют как устройства, вырабатывающие электрическую энергию на электростанциях любого вида и масштаба, на современных мобильных транспортных средствах (автомобилях, тракторах, тепловозах, летательных аппаратах, подводных лодках, кораблях). Синхронные генераторы — это база для развития техники трехфазного переменного тока. Номинальные единичные мощности турбогенераторов достигают ныне 1600 МВт, гидрогенераторов — 1000 МВА.

Затем ученый создал трехфазный электродвигатель со статором в виде кольца Грамма, питаемого в трех точках, и ротора в виде сплошного медного цилиндра. Но КПД этого двигателя был низок. Ротор не подходил, потому что медь является плохим проводником для магнитного потока, создаваемого током в обмотках статора. Если же применить стальной цилиндр, то магнитный поток резко возрастает, но вместе с тем из-за худшей электрической проводимости уменьшаются ток ротора и вращающий момент. Ученый разрешил это противоречие. Он изготовил ротор из литого железа (хорошая магнитная проводимость) с насаженным полым медным цилиндром (хорошая электрическая проводимость). Такой вариант оказался лучше первого, и вскоре Доливо-Добровольский еще более улучшил конструкцию асинхронного электродвигателя: в просверленные

по периферии ротора отверстия были заложены медные неизолированные стержни, соединенные между собой электрически на лобовых частях ротора медными кольцами. Так возникла конструкция «беличьей клетка».

8 марта 1889 года он сделал патентную заявку (от имени фирмы AEG) на трехфазную систему. Эксперты патентного ведомства требовали бесконечных уточнений. Пока тянулись переговоры по заявке, в июне оказалась запатентована трехфазная система немецкого инженера Ф. Хазельвандера (его патент позднее был аннулирован на основе патентов Теслы). Доливо-Добровольскому в Германии выдали частичный патент от 31.08.1889 г. на «Якорь двигателя переменного тока» с описанием в нем различных конструкций короткозамкнутых роторов типа «беличьей клетка». Некая моральная компенсация!

Конструкция ротора была настолько удачной, что успешно применяется и в наши дни как в асинхронных, так и синхронных электродвигателях. В асинхронных машинах малой и средней мощности ротор изготавливают путем заливки расплавленного алюминиевого сплава в пазы сердечника. Вместе со стержнями «беличьей клетки» отливают короткозамыкающие кольца и торцевые лопасти, осуществляющие самовентиляцию машины. В асинхронных электродвигателях большой мощности «беличью клетку» выполняют из медных стержней, концы которых сваривают в короткозамыкающие кольца. Простота устройства и легкость в изготовлении по сравнению с электродвигателями постоянного тока, малый момент инерции, долговечность, отсутствие щеточно-коллекторного узла (скользящих контактов и коммутатора) и низкие затраты на обслуживание стали очевидными достоинствами этой конструкции.

Созданный ученым трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором является основным типом двигателей переменного тока современности. Его конструкция благодаря простоте, надежности, дешевизне и экономичности при эксплуатации сохранилась в общих чертах до настоящего времени: три неподвижные катушки размещены по всей цилиндрической поверхности внутри сердеч-

ника статора, а между ними вращается вместе с валом в подшипниках четвертая. За 120-летие существования асинхронных электродвигателей в них совершенствовались применяемые электротехнические материалы, конструкция отдельных узлов и деталей, технология их изготовления, снижались габаритные размеры и масса, но предложенные Доливо-Добровольским принципиальные подходы остались неизменными. Асинхронные машины могут работать в режимах двигателя, генератора, электромагнитного тормоза, преобразователя частоты и числа фаз, машины двойного питания, индукционного регулятора напряжения и фазорегулятора, электромагнитной муфты и т. п. В различных каскадных соединениях они применяются для регулирования скорости вращения, преобразователя частоты, электрического вала и др.

Трехфазные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором без повреждений выдерживают значительные кратковременные перегрузки, их можно использовать в тяжелых условиях окружающей среды, они не требуют большого числа обслуживающего персонала, нет коллекторно-щеточного механизма, а поэтому нет и ограничения в предельной мощности (диапазон мощностей составляет от долей ватта до десятков МВт). Для систем автоматики создано большое количество разновидностей и модификаций маломощных одно-, двух- и трехфазных асинхронных машин с различными конструкциями ротора — короткозамкнутого и фазного с контактными кольцами: асинхронные исполнительные и управляемые двигатели, тахогенераторы, сельсины, поворотные трансформаторы... Находят применение разнообразные линейные асинхронные двигатели с «бегущим магнитным полем» вместо вращающегося.

III.

После получения благоприятных результатов испытания первого трехфазного асинхронного электродвигателя Доливо-Добровольский спроектировал двигатель мощностью 5 л. с. (3,68 кВт). Для уменьшения потерь мощности от вихревых токов его ротор сделали шихтованным из железных листов. При начальных испытаниях было установлено значительное ухудшение пусковых

свойств. Двигатель издавал сильный шум и наблюдался большой бросок тока. Когда электродвигатель потреблял небольшой ток, шум исчезал. При перегрузке на 50% он останавливался и начинал гудеть. Доливо-Добровольский такое явление объяснил тем, что ротор был слишком сильно замкнут накоротко по сравнению с предыдущим двигателем. Устранить это он сумел, удалив из конструкции часть медных стержней. При увеличении сопротивления обмотки ротора пусковые условия улучшались (не было избыточного пускового тока, шума и вибрации соединительных проводов), но рабочие характеристики двигателя ухудшались.

Анализ возникших затруднений привел к созданию фазного ротора с изолированной обмоткой, соединенной в звезду с выведенными концами к трем кольцам, которые были установлены изолированно на вал. С помощью щеток эти кольца соединили с переменными сопротивлениями (пусковым реостатом). В момент пуска включали в цепь ротора большое сопротивление. Пусковой ток уменьшался, а пусковой вращающий момент увеличивался по сравнению с прямым пуском трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором. По мере нарастания частоты вращения вала добавочные сопротивления в цепи ротора выводили полностью до короткого замыкания. При этом двигатель начинал вращаться спокойно и плавно. Так был создан Доливо-Добровольским трехфазный асинхронный электродвигатель с контактными кольцами, который оставался основным типом в 90-х годах XIX века и начале XX-го века.

В 1889-1890 годах Доливо-Добровольский вместо трех обычных однофазных трансформаторов создал трехфазный. Вначале он был с радиальным расположением сердечников. Его конструкция напоминала электрическую машину с выступающими полюсами, в которой устранен воздушный зазор, а обмотки ротора перенесены на стержни. Это были два концентрически расположенных кольца с тремя радиально установленными сердечниками для обмоток трансформатора. Затем предложено несколько конструкций призматических трансформаторов, в которых удалось получить более компактную форму магнитопровода. У них три вертикальных стержня с обмотками и два



одинакового диаметра кольца замыкались по торцам стержнями. В качестве варианта предлагалось заменить кольца звездообразными замыкающими ярмами. Но они имели пространственный магнитопровод и вследствие сложности технологии их изготовления призматические трансформаторы не получили применения. В 70-х годах XX века было освоено производство рулонной холоднокатаной стали, для обмоток начали использовать алюминиевую фольгу и ленту и стало возможным серийное производство мощных трехфазных трансформаторов с пространственным магнитопроводом.

Изучая распределение магнитных потоков в призматическом трансформаторе с замыкающими кольцами на концах сердечников, Доливо-Добровольский пришел к выводу, что их сумма в любой момент времени равна нулю. Поэтому можно разрезать замыкающие кольца и развернуть трансформатор в одну плоскость. Три стержня будут расположены параллельно в одной плоскости. Четвертый не нужен.

Осенью 1891 года ученый подал патентную заявку на трехфазный трансформатор с параллельными стержнями, расположенными в одной плоскости. Эта конструкция получила широкое распространение из-за меньшей материалоемкости и минимальных отходов электротехнической стали при штамповке отдельных листов и сохранилась по настоящее время. Эксплуатация трехфазных трансформаторов показала высокую степень их надежности. В системе передачи электрической энергии от электрических станций к потребителям необходимым элементом являются трансформаторы. Передача большой мощности на дальние расстояния может быть осуществлена только при относительно малом значении тока и следовательно при высоком напряжении.

В 1976 году отечественная электропромышленность освоила новый комплекс электрооборудования на переменное сверхвысокое напряжение 1150 кВ. Сейчас трехфазные трансформаторы используются при электроснабжении (силовые), где применяется многократная трансформация переменного тока, поэтому суммарная мощность установленных силовых трансформаторов на повышающих и понижающих подстанциях в 9-10 раз превышает суммарную мощность синхронных генераторов электриче-

ских станций. Номинальные мощности и напряжения современных трансформаторов колеблются от долей ВА и В до сотен тысяч кВА и свыше тысячи кВ.

В этот же период Доливо-Добровольский создал основы теории и проектирования трансформаторов, опровергнув распространенное ошибочное утверждение о том, что трансформаторы принципиально не могут быть экономичными аппаратами, и разработал другие элементы трехфазных цепей переменного тока: схемы включения генераторов и двигателей звездой и треугольником (возможность получения в одной сети двух уровней мощности), пусковые реостаты для асинхронных электродвигателей с фазным ротором и четырехпроводную схему трехфазной цепи с нейтральным (нулевым) проводом. Он обосновал, что четырехпроводная трехфазная система располагает двумя рабочими напряжениями (фазным для включения осветительной нагрузки и повышенным линейным — для силовой), допускает несимметрию нагрузки при неизменности фазных напряжений.

IV.

Для доказательства преимуществ трехфазной системы Доливо-Добровольский спроектировал и предложил построить для Международной электротехнической выставки во Франкфурте-на-Майне линию электропередачи длиной 120 миль (173,08 км) от гидростанции Лауфенского водопада у цементной фабрики на реке Неккар. Там был установлен генератор мощностью 300 л.с. (230 кВА) и напряжением 95 В со схемой соединения обмоток в звезду, созданный главным инженером швейцарской фирмы «Машинен-фабрик Эрликон» Ч. Ю. Л. Броуном, который сотрудничал в области конструирования многофазных машин переменного тока с Доливо-Добровольским. Под его руководством за полгода такая линия при поддержке трех правительств через германские королевства Вюртемберг, Бавария и Пруссия была построена. На каждом конце линии были включены трехфазные трансформаторы с магнитопроводами призматической формы, погруженными в баки с маслом, мощностью 150 кВА каждый с коэффициентами трансформации 154 (95/15000 В) в Лауфене и 116 (15000/65 В, *путем последовательного включения обмоток*

высшего напряжения двух трансформаторов) во Франкфурте.

Приборов для измерения напряжения выше 1000 В не существовало, поэтому напряжение линии определяли умножением низшего напряжения на коэффициент трансформации. Трехпроводная линия была выполнена на деревянных опорах с пролетом 60 м. Медный провод диаметром 4 мм крепился на штыревых фарфоро-масляных изоляторах. В начале линии в разрыв каждого провода включен участок длиной 2,5 м, состоявший из двух медных проволок диаметром 0,15 мм каждая. Для отключения линии во Франкфурте-на-Майне устраивалось трехфазное короткое замыкание, плавкие вставки перегорали, турбина начинала развивать большую скорость, и машинист, заметив это, останавливал ее. Мощность была столь велика, что на выставочной площадке от понижающего трансформатора питались 1000 ламп накаливания напряжением 65 В, расположенные на огромном рекламном щите, а также здесь же был установлен трехфазный асинхронный электродвигатель Доливо-Добровольского мощностью 75 кВт, изготовленный для выставки и приводивший в действие гидравлический насос мощностью 100 л. с. (73,6 кВт) декоративного водопада.

Двигатель показал хорошие эксплуатационные свойства (простоту, надежность и высокий КПД). Он был выполнен обращенным, то есть с питанием со стороны ротора через контактные кольца, установленные изолированно на валу. Так как не было точно известно, при каком напряжении (100 или 170 В) двигатель будет работать, на его валу установили шесть контактных колец. Это давало возможность переключения его обмотки со звезды на треугольник. В настоящее время такие переключения применяют для пуска мощных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором (их изготавливают на два номинальных напряжения, отличающихся в 1,73 раза), нормально работающих при соединении обмоток статора в треугольник и при небольшом нагрузочном моменте сопротивления на валу. Броски пусковых токов уменьшаются в 3 раза по сравнению с прямым пуском.

Одновременно Доливо-Добровольский экспонировал асинхронный трехфазный электродвигатель мощностью 100 Вт с вен-

тилятором на его валу и двигатель мощностью 1,5 кВт с сидящим на его валу генератором постоянного тока, питающим лампы накаливания. Испытания электропередачи, которые проводились Международной комиссией под председательством немецкого ученого Г. Гельмгольца в августе и сентябре 1891 года были успешными. Минимальный КПД электропередачи при фазном напряжении 8500 В (отношение мощности на вторичных зажимах трансформатора во Франкфурте-на-Майне к мощности на валу турбины в Лауфен) — 68,5%, максимальный КПД — 75,2%, что явилось убедительной иллюстрацией преимуществ трехфазных цепей. Это была первая в мире передача электроэнергии на большое расстояние, основанная на применении трехфазного переменного тока. Ученый вывел формулу, по которой потери энергии уменьшались с квадратом роста напряжения в линии, и он после окончания выставки поднял линейное напряжение до 25,1 кВ. КПД возрос до 78,9%. При дальнейших опытах напряжение в линии поднималось до 28 кВ. КПД возрос до 80%.

Франкфуртская выставка взволновала все инженерное сообщество и стала началом эпохи зарождения электротехники переменного трехфазного тока, внесшей переворот в решении ее проблем. Среди них основная — электрическая передача огромного количества энергии на большие расстояния. От генераторов постоянного тока невозможно было получить достаточно высокого напряжения, трансформировать постоянный ток до напряжений электроприемников. Применение однофазного переменного тока исключалось из-за отсутствия пригодных для практики двигателей. Доливо-Добровольский получил мировую известность, а в электротехнике наступил новый этап развития: повсеместно стала применяться трехфазная система токов при электрификации различных отраслей народного хозяйства отдельных стран, приведшая к огромным изменениям в мировой экономике.

Электрификация вытесняла из системы промышленного привода паровую машину, работающую на трансмиссию. Шумный паровой двигатель производственных цехов переходил в машинные залы электростанции, становясь первичным двигателем ге-



нераторов, дающих энергию вторичным электрическим двигателям группового и одиночного привода. Последний вид привода освобождал промышленное предприятие от трансмиссий и позволял работать каждому отдельному исполнительному механизму при переменных нагрузках и оптимальных скоростях, а также позволял ускорять пуск и реверс. Сближение приводного двигателя с исполнительным механизмом иногда получалось настолько тесным, что конструктивно они представляли единое целое.

В докладе на Международном конгрессе электриков, состоявшемся во Франкфурте-на-Майне в 1891 году, Доливо-Добровольский показал, что магнитный поток катушки, включенной в цепь переменного тока, при неизменных частоте и числе витков определяется напряжением и не зависит от магнитного сопротивления этой катушки. От величины магнитного сопротивления зависит значение намагничивающего тока. В настоящее время это положение является исходным в расчетах электромагнитных устройств переменного тока. Кроме того, ученый сообщил, что если магнитный поток изменяется синусоидально, то ЭДС и напряжение также изменяются по закону синуса, причем ЭДС и магнитный поток сдвинуты по фазе на 90 градусов.

Им введены понятия активной и реактивной составляющих тока, а метод разложения тока на две составляющие был рекомендован для практических расчетов и анализа процессов в электрических машинах и аппаратах. Доливо-Добровольский обосновал необходимость передачи синусоидального тока как наименее подверженного искажениям, не без его влияния в Европе принята частота промышленного тока 50 Гц (в США вначале применяли промышленные частоты 133, 40 Гц, а затем перешли на 60 Гц).

V.

На выставке 1891 г. ученый сделал открытие: обнаружил повышение на 8–9% напряжения на зажимах генератора в Лауфене при включении незамкнутой во Франкфурте-на-Майне линии. Так им была зафиксирована реакция якоря генератора на емкостную нагрузку. По этому поводу он опубликовал статьи «Передача

энергии трехфазным током» и «О некоторых особенных явлениях в высоковольтных системах».

Доливо-Добровольский установил, что для трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором можно достичь достаточного вращающего момента при напряжении, составляющем часть номинального, но при увеличенном скольжении и токе. Он в 1892 году построил трехфазный автотрансформатор с переменным коэффициентом трансформации, который при пуске трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором во много раз уменьшал ток, потребляемый из электросети. Метод автотрансформаторного пуска при пониженном напряжении, разработанный Доливо-Добровольским, применяется в настоящее время для мощных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, так как пусковые токи в сети в квадрат коэффициента трансформации раз меньше, чем при прямом пуске.

Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором имели небольшой пусковой вращающий момент и значительный пусковой ток, что являлось существенным недостатком «беличьей клетки». В 1892 году Доливо-Добровольский предложил трехфазный асинхронный электродвигатель с двухрядной «беличьей клеткой», внешние стержни которой имели меньшее сечение, чем стержни внутренней клетки ротора, что облегчало пуск. Он нашел оптимальное решение в соотношении сопротивлений между наружной и внутренней клетками, когда удалось достичь значительного улучшения пусковых характеристик трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором и незначительным снижением коэффициента мощности.

В том же году Доливо-Добровольский изобрел и изготовил индукционный измерительный механизм, в котором он удачно применил мягкое железо и принцип электродвигателя с вращающимся магнитным полем переменного тока и подвижной частью в виде диска, создал приборы для устранения помех в телефонах от электрических сетей промышленных токов и для измерения величины потерь от вихревых токов и гистерезиса

при перемагничивании листов стали сердечников электрических машин и трансформаторов, позволявший определять искомые потери путем измерений только небольшого количества испытуемого материала по показаниям обычных электроизмерительных приборов — ваттметра и амперметра. Этот вариант был прототипом приборов Эпштейна, которые до сих пор широко применяются в измерительной технике. В работе «О применении железа в электрических измерительных приборах» он указал на основные достоинства индукционных измерительных приборов (ваттметров, фазометров и частотомеров): довольно большой вращающийся момент, простота, выносливость и независимость показаний от влияния внешних магнитных полей. Привел ряд соображений о выборе значения магнитодвижущей силы (МДС) и воздушного зазора для получения линейной зависимости между напряженностью магнитного поля МДС и малых погрешностей от гистерезиса.

Расширению сетей постоянного тока с лампами накаливания напряжением 110–220 В препятствовала невозможность применения более высокого напряжения. При напряжении 220 В радиус района сети не мог превышать 1–1,5 км. При большем радиусе электроснабжающая установка становилась неприемлемой с экономической точки зрения из-за огромных размеров потерь напряжения. Для удовлетворительного горения ламп накаливания должны были применяться провода большого диаметра со значительным перерасходом меди. Чтобы устранить этот недостаток и увеличить напряжение в линии электропередачи постоянного тока вдвое больше, чем у потребителя, в распределительной сети между проводами включались последовательно две лампы накаливания, а третий уравнивающий провод малого сечения соединял между собой общие зажимы ламп. Для того чтобы такая трехпроводная система могла работать, т. е. чтобы каждая лампа получала половину общего напряжения сети, в питающую сеть включались специальные машины «уравниватели» или агрегаты из двух машин, валы которых прочно закреплялись между собой.



Михаил Осипович Доливо-Добровольский.

VI.

Применение вращающихся уравнивательных машин вызывало затруднения при эксплуатации и заставляло отказываться от трехпроводной системы постоянного тока. В 1893 году Доливо-Добровольский заменил вращающиеся машины одной неподвижной индукционной катушкой на железном сердечнике. Он учел то обстоятельство, что в генераторах постоянного тока в обмотках якоря протекает переменный ток, и если к концам обмотки якоря включить катушку с большим коэффициентом самоиндукции, то она будет иметь большое сопротивление прохождению переменного тока и не станет препятствовать прохождению постоянного тока. Снабдив якорь, кроме коллектора, двумя контактными кольцами и включив катушку через кольца между концами обмотки якоря и присоединив к середине ее обмотки третий провод, можно добиться как деления напряжения, так и постоянства напряжения в двух половинах трехпроводной системы, не прибегая к вращающимся машинам. Экономичный делитель напряжения Доливо-Добровольского позволял использовать в линиях электропередачи напряжение вдвое больше, чем у потребителя. Как простое в эксплуатации приспособление он получил распространение в установках постоянного тока. Его применение стало более



редким после того, как трехфазный ток почти целиком вытеснил постоянный ток.

В 1894 году ученый изобрел фазометр для измерения величины угла фазного расхождения между векторами тока и напряжения при силовой нагрузке в сети переменного тока. Его ваттметры, фазометры и частотомеры отличались простотой, выносливостью и получили в свое время широкое применение в качестве измерительных приборов для распределительных щитов на электрических станциях. И теперь принцип электродвигателя с вращающимся магнитным полем переменного тока применяется для устройства электрических измерительных приборов, используемых для самых разнообразных целей.

В декабре 1899 года Доливо-Добровольский приехал в Россию для участия в Первом всероссийском электротехническом съезде. Этот приезд дал возможность ему познакомить русских электротехников с успехами изобретенной им системы трехфазных токов почти за десятилетний период ее существования. Одновременно он помог своими знаниями и опытом как человек имевший уже большой опыт работы в электротехнической промышленности в Германии и Швейцарии. Помог в организации электротехнического отделения (так назывались тогда в технических высших школах факультеты) в Санкт-Петербургском политехническом институте (ныне Санкт-Петербургский государственный политехнический университет) для подготовки отечественных инженеров-электриков. Ученый принял деятельное участие путем устных и письменных консультаций в разработке принципов учебного плана и методов преподавания, в создании электротехнических лабораторий и содействовал в получении для них оборудования и т.п. Санкт-Петербургский электротехнический институт (ныне Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет) присвоил ему звание Почетного инженера-электрика.

Напряженный труд подорвал здоровье Доливо-Добровольского. С 1903 по 1909 год он болел. Но как только наступило улучшение, Михаил Осипович вернулся на работу и занял должность технического директора завода фирмы AEG. В 1910–1914 годах им первым был предложен широко применя-

ющийся в настоящее время метод гашения электрической дуги в выключающих аппаратах с применением искрогасительной решетки.

Когда в 1914 году началась Первая мировая война, Доливо-Добровольский (сохранивший российское гражданство) был вынужден переехать в Швейцарию. Здесь он занялся расчетами передачи электроэнергии на сверхдальние расстояния (сотни и тысячи км) и пришел к неожиданным выводам, которые им были в 1918 году изложены в докладе «О границах применения переменных токов для передачи энергии на большие расстояния». Переменный ток из-за влияния емкости и самоиндукции воздушной линии электропередачи и резко возрастающих потерь экономически не целесообразно передавать на расстояния свыше 500 км, и нужно переходить на воздушные линии постоянного тока; для подземных кабельных сетей еще более узки границы применимости переменного тока при дальних передачах электрической энергии.

Будущее развитие электроэнергетики ученый видел в дальних электропередачах постоянным током напряжением в миллионы вольт по подземным кабелям. Как будет получаться постоянный ток очень высоких напряжений, он не знал, но был уверен, что когда это потребуется, то способ получения сверхвысокого напряжения для электропередач будет найден. Жизнь подтвердила его прозорливость. В нашей стране первая мощная линия электропередачи постоянного тока напряжением 800 кВ длиной 473 км Волжская ГЭС — Донбасс введена в действие в 1966 году. В 80-х годах XX века линии электропередачи на сверхдальние расстояния (1500 км) были выполнены на постоянном токе напряжением 1500 кВ.

После окончания Первой мировой войны в 1918 году Доливо-Добровольский вернулся в фирму AEG. Но тяжелая болезнь сердца, преследовавшая его с детских лет, обострилась, и вскоре 15 ноября в возрасте 56 лет он скончался. Похоронен в Гейдельберге (округ в составе Баварии).

Русский инженер Михаил Доливо-Добровольский дал миру систему трехфазного тока с трех- и четырехпроводными цепями, трехфазный синхронный генератор, трехфазный асинхронный электродвигатель в двух его модификациях (с короткозамкну-

тым и фазным ротором), трехфазный трансформатор и автотрансформатор, пусковые реостаты, коммутационные устройства (выключатели), измерительные приборы, построил первую в мире трехфазную систему передачи электроэнергии на большие расстояния.

Экономические преимущества централизованного производства электрической энергии трехфазными синхронными генераторами, ее передачи путем преобразования напряжения трехфазными трансформаторами и автотрансформаторами, простота распределения, делимость электрической мощности практически до любых пределов позволили трехфазному асинхронному электродвигателю занять первое место в электроприводе во всех отраслях народного хозяйства. Асинхронные машины являются основными преобразователями электрической энергии в механическую. У них активная мощность, а следовательно, и вращающий момент не содержит пульсирующей составляющей.

Основные направления исследований Доливо-Добровольского имели практический характер, которое совпало с главным направлением развития электроэнергетики. Он работал в условиях наиболее развитой в то время германской электротехнической промышленности и, являясь одним из технических руководителей (шеф-электриком) крупнейшей электротехнической фирмы, располагал большими возможностями для экспериментального исследования и реализации своих изобретений. Изготовленные на основании его расчета конструкции после испытания и анализа результатов давали ему возможность оценить правильность понимания

сущности физического явления и пригодность принятой рабочей гипотезы.

В его статьях и докладах формировались элементы теории трансформаторов и асинхронных машин; они содержат рассуждения о недопустимости сосредоточенных обмоток в машинах переменного тока, вызывающих пульсацию МДС, повышающих магнитное рассеяние и ухудшающих условия пуска. Стержни короткозамкнутой «беличьей клетки» он предлагал делать неизолированными, соединяемыми по торцам кольцами, сердечник ротора — шихтованным, сердечник статора — шихтованным с полужакрытыми пазами. Он первым показал, что переход от двухфазной системы к трехфазной улучшает как распределение МДС по окружности статора асинхронного двигателя, так и использование машины.

Все методы расчета, установленные им, были правильны и не потеряли практического значения до нашего времени. Посредством бесед, научных диспутов, докладов и статей он добился того, что у него в применении трехфазного переменного тока не осталось идейных противников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веселовский О. Н. Михаил Осипович Доливо-Добровольский, — М.: ГЭИ, 1958.
2. Белькинд Л. Д. М. О. Доливо-Добровольский. К 25-летию со дня смерти//Электричество, — 1945. — № 3.
3. Угримов Б. И. Пятьдесят лет трехфазного тока// Электричество, — 1940. — № 1.
4. Люди русской науки: Очерки о выдающихся деятелях естествознания и техники/Под ред. С. И. Вавилова. — М., Л.: Гос. изд.-во техн.-теоретической литературы, 1948.
5. Кузнецов Б. Г. Два века русской электротехнической мысли//Электричество. — 1940. — № 1.
6. Гусев С. А. Очерки по истории развития электрических машин. — М., Л.: ГЭИ, 1955.
7. Шателен М. А. Русские электротехники второй половины XIX века, М.: ГЭИ, 1955.
8. Веселовский О. Н., Шнейберг Я. А. Очерки по истории электротехники, — М.: МЭИ, 1993 ●

SQUIRREL CAGE IN THREE-PHASE MOTOR

Mikhail Ossipovich Dolivo-Dobrovolsky (to the 150th Anniversary of the birth)

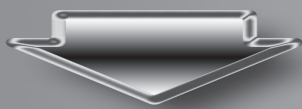
Grigoriev, Nickolay D. — Ph. D. (Tech), associate professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

Mikhail Dolivo-Dobrovolsky (born in January, 1862) was a prominent Russian scientist and inventor. His name is well known in electrical engineering. His merits were particularly important for developing electric alternating current motors which are used nowadays for transportation as well as in other industries.

Key words: electric machinery, electric motors, Dolivo-Dobrovolsky, history, technics.

Координаты автора (contact information): Григорьев Н. Д. — 8 (495) 684-21-19.





В течение последних лет железные дороги Canadian Pacific и Northern Pacific пользовались гидравлическим способом производства земляных работ для замены некоторых деревянных виадуков более устойчивыми насыпями.

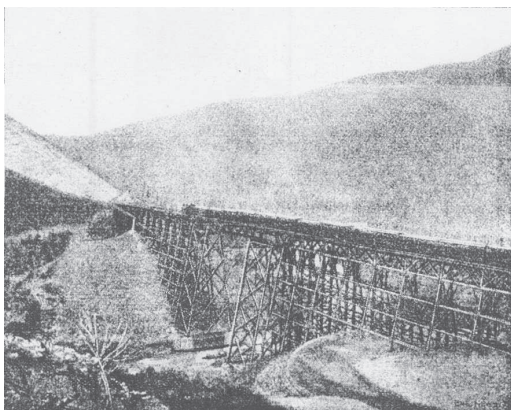


Рис. 1.



Рис. 2.

Рисунки, поясняющие настоящую заметку, изображают усиление насыпью виадука близ Mountain Creek на железной дороге Canadian Pacific. Длина этого виадука 1611 футов (491 метр), а высота его над тальвегом 145 футов (44,2 метра).

На рис. 1 изображена концевая часть виадука. Вода из источника, протекающего в окрестных горах, доставляется при помощи стального водопровода и направляется сильными струями в скат холма, а земля, увлекаемая потоком этой воды, отводится посредством канала к тому месту, которое должно быть занято насыпью.

На рис. 2 представлена насыпь, отчасти уже оконченная. Устье канала может быть направляемо по желанию в ту или другую сторону, позволяя распределять работу и уравнивать соответствующим образом осадку земли.

Головная часть насыпи укреплена рядом старых канатов, образующих своего рода неглубокую запруду, которая задерживает воду и способствует вследствие этого осаждению самых мелких частиц земли, несомых водою. Запруда препятствует равным образом размыванию от-

коса действием слишком сильного потока. Для этой цели часто употребляют также ветви ели, сосны, кедра, если их можно достать скорее, чем старые канаты.

Описываемый виадук состоял первоначально из деревянного настила и деревянных ферм, опиравшихся на каменную кладку; впоследствии он был заменен виадуком, которого настил и фермы были стальные. На рис. 2 можно видеть прежнюю, теперь оставленную, эстакаду. Работы, производимые в настоящее время, дают возможность устроить стальные настилы с каждой стороны центрального настила. Фермы этих новых настилов будут опираться на насыпь, сооруженную гидравлическим способом.

Железная дорога Northern Pacific построила 30 подобных сооружений в районе Cascade Mountains. Объем устроенных таким образом насыпей равняется нескольким миллионам кубических ярдов, а средняя стоимость сооружений составляет около 6 процентов за куб. ярд (около 39 сантимов за куб. метр).

М. Б.

(Железнодорожное
дело.—1900.—№ 37.—С. 395—396)
Из фондов библиотеки МИИТ. ●